



## Ordonnancement des activités de maintenance sous contraintes de compétences.

François Marmier, Christophe Varnier, Nourredine Zerhouni

### ► To cite this version:

François Marmier, Christophe Varnier, Nourredine Zerhouni. Ordonnancement des activités de maintenance sous contraintes de compétences.. Symposium International sur la Maintenance et la Maîtrise des Risques, MMR'06., Nov 2006, Rabat, Maroc. pp.169-184. hal-00334165

**HAL Id: hal-00334165**

**<https://hal.science/hal-00334165>**

Submitted on 24 Oct 2008

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

---

# Ordonnancement des Activités de Maintenance sous Contraintes de Compétences

François Marmier - Christophe Varnier - Nouredidine Zerhouni

Laboratoire d'Automatique de Besançon (LAB) UMR CNRS 6596  
24, rue Alain Savary  
25000 Besançon  
{Fmarmier, Cvarnier, Nzerhouni}@ens2m.fr

---

*RÉSUMÉ. La gestion de compétences dans l'industrie est l'une des clefs les plus importantes afin d'obtenir le meilleur des moyens de production, particulièrement dans le domaine de la maintenance où les différentes connaissances ou qualifications sont les outils de travail du personnel. Nous proposons ici une méthodologie, qui compare les ressources humaines à des machines parallèles. Etant donné que les niveaux de compétence de chacun sont différents, elles sont considérées comme des machines parallèles indépendantes. Notre but est d'affecter la charge aux ressources adéquates tout en minimisant le temps de traitement de chacune d'entre elles ainsi que la fin de l'ordonnancement.*

*ABSTRACT. Competencies management in the industry is one of the most important keys in order to obtain good performance with production means. Especially in maintenance services field where the different practical knowledges or skills are their working tools. We propose here a methodology, which compares the human resource with parallel machine. As human resource competence levels of each are all different, they are considered like unrelated parallel machines. Our aim is to assign tasks to the adequate resources by minimizing time treatment for each task and the makespan.*

*MOTS-CLÉS Disponibilité, Compétence, Contrat, Machines parallèles, Maintenance, Ordonnancement, Ressources Humaines..*

*KEYWORDS: Competence, Contract, Human Resource, Maintenance, Scheduling, Unrelated Parallel Machine.*

---

## **1. Introduction**

Pour rester compétitive, les entreprises doivent gérer le plus efficacement possible leurs coûts de fonctionnement et optimiser leurs moyens de production. Afin d'obtenir une meilleure disponibilité des équipements, et à travers eux, de l'entreprise, le service de maintenance intervient. Il remet les équipements de production en état de bon fonctionnement avant ou après qu'ils soient tombés en panne. Son rayon d'intervention est aussi étendu que l'entreprise et la qualité des améliorations apportées par celui-ci nécessite une bonne gestion de son personnel et de ses compétences.

Il n'est pas possible de déterminer exactement le nombre de ressources humaines nécessaire au sein d'un service de maintenance (Mjema, 2002). En effet, les facteurs rendant possible le calcul de la capacité adaptée sont sujets à des incertitudes (variations des demandes d'interventions, dates d'arrivée des demandes, contenu des demandes, durées de traitement et disponibilité des équipements à maintenir ainsi que du traitement réel des interventions). Les tâches ne sont donc réellement connues que lorsque le service de maintenance reçoit les demandes d'intervention. La réactivité et l'organisation du service de maintenance dépendront alors de l'importance de l'intervention requise.

Il existe principalement deux types de maintenance: la maintenance préventive, dont l'activité peut être planifiée sur du long terme, et la maintenance corrective qui fait référence au traitement des pannes non prévisibles. Au sein du service de maintenance, les employés ont des compétences différentes ainsi que différents niveaux de qualification dans chacune d'entre elles. La rapidité du traitement d'une intervention dépendra donc de la ressource choisie pour l'intervention.

L'objectif de cette gestion des activités de maintenance est d'affecter les tâches à la meilleure ressource connue. Dans cet article, nous détaillons donc une méthodologie qui permettra d'affecter les tâches en répartissant la charge entre les ressources. La suite de l'article est donc organisée de la manière suivante: Dans la deuxième section, nous introduirons la manière dont les services de maintenance sont gérés. En troisième partie, nous présenterons la problématique d'ordonnancement. Puis nous développerons notre modèle ainsi qu'une méthode de résolution. Enfin nous discuterons les différents résultats obtenus.

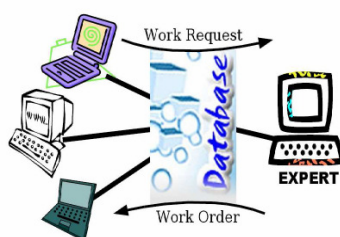
## **2. Gestion de la maintenance**

Il y a plusieurs formes de gestion de la maintenance. En effet, si l'entreprise n'assume pas elle-même cette charge, elle peut la confier à une entreprise sous-traitante. La surveillance, la maintenance préventive et corrective peuvent donc être confiées directement au fabricant de l'équipement (expert sur ce type d'équipement) ou à une entreprise spécialisée dans la maintenance industrielle (experte en surveillance et maintenance, mais pas nécessairement spécialisée sur le type

d'équipement surveillé). L'équipement peut aussi être loué et, si la maintenance n'est pas réalisée par l'entreprise utilisatrice, elle peut être sous-traitée de même.

D'une manière globale, notre travail est ciblé sur le cas des entreprises multi-sites, dans lesquelles chaque site peut avoir son propre service de maintenance. L'un de ces services peut avoir un intérêt plus particulier, car il peut avoir la responsabilité des interventions nécessitant de l'équipement important ou des équipes qualifiées. Dans cet article, nous traiterons de l'ordonnancement des activités de maintenance telles que l'on peut les rencontrer au sein de chacun des sites.

Le service de maintenance doit répondre à la demande des différents services de l'entreprise. Pour ce faire, il dispose de ressources humaines et matérielles. Les ressources humaines sont toutes différentes, ce qui est dû à leurs différences de niveau de qualification dans les domaines techniques requis. De plus, les ressources humaines sont en quantité limitée; le nombre maximum de tâche pouvant être traité simultanément sera donc égal au nombre de ressource. Le temps de traitement d'une tâche dépend du choix de la ressource qui en assumera la charge. Celui-ci variera si l'on choisit d'en changer l'affectation. Cependant, toutes les ressources doivent être occupées de manière identique, afin d'éviter les surcharges de travail des meilleurs techniciens. Une tâche ne sera donc pas nécessairement affectée à la meilleure ressource (du point de vue qualification pour ce type de tâche).



**Figure 1.** *Communication avec la base de données*

La gestion distante de la maintenance présente un mode de communication informatisé propre. Lorsqu'une panne survient, le service demandeur de la réparation dépose une demande d'intervention (Work Request) à l'attention du service de maintenance. Celle-ci est enregistrée dans la base de données de la GMAO (Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur) et contient les différentes informations correspondant au problème à résoudre. Ces informations vont permettre au service maintenance de pouvoir déterminer à quelle ressource affecter la tâche.

Périodiquement, le responsable du service maintenance collecte les demandes d'interventions déposées dans la base de données depuis le poste expert (figure 1). Le poste expert correspond au poste de travail du responsable sur lequel vont se dérouler les processus d'affectation. Dès lors que le poste expert a traité toutes les informations, à l'aide du programme d'ordonnancement, il réalise les affectations. Le poste expert détermine donc pour chaque tâche de maintenance l'emplacement le plus adéquat dans les plannings des employés. Il publie ensuite ces affectations sous forme d'ordre de travail (Work Order) dans la base de données qui est consultable sur n'importe quel poste de travail en lien avec la base de données.

## **2.1. Gestion des tâches**

L'équipement qui a subi un arrêt du à une panne voit son taux de disponibilité diminuer. La différence entre ce taux et celui contracté avec l'entreprise sous-traitante se ressent. Dans le cas d'un nouvel arrêt, la date de fin de l'intervention nécessaire sera plus rapprochée que celle fixée pour l'arrêt précédent. La disponibilité devient donc le premier facteur considéré, dans la construction d'un ordonnancement, à travers la date de fin de traitement des tâches.

Dans la littérature, la disponibilité est connue comme une contrainte temporelle (Baptiste *et al.*, 2001) pour le positionnement de tâche lors de la réalisation d'un ordonnancement. Cela signifie que l'équipement est en fait occupé durant une certaine période par une activité telle que la maintenance (Aggoune, 2003), (Sheen *et al.*, 2003). L'indisponibilité est aussi utilisée pour signifier que les ressources ne peuvent pas travailler entre certaines dates (Adzakpa *et al.*, 2003). A notre connaissance, le concept de disponibilité (ou plutôt de disponibilité d'équipement), est généralement considéré dans la littérature comme une donnée du problème. Dans notre travail, nous la considérons comme un indicateur d'urgence qui permet l'affectation de priorité entre les différentes tâches à ordonnancer.

La disponibilité des équipements permet de déterminer la date avant laquelle l'équipement doit être rendu opérationnel. Nous obtenons donc une date de fin de traitement maximal (deadline) mais aussi une période durant laquelle le traitement de la tâche doit être réalisé. Une tâche ayant une période de traitement très réduite aura donc un niveau de priorité plus important qu'une tâche dont le traitement peut être reporté.

## **2.2. Gestion des ressources humaines**

### **2.2.1 Gestion des compétences**

Boumane *et al.* (Boumane *et al.*, 2003) ont étudié les différents types de compétences, qui peuvent être génériques et utilisées dans de nombreuses situations professionnelles, ou spécifiques à une activité. Durant sa thèse, Agnès Letouzey a

mené une étude sur 19 entreprises afin d'obtenir leur avis sur le problème de l'affectation des opérateurs (Letouzey, 2001). Cette étude montre que la gestion du personnel, en fonction de leurs compétences, est importante pour les leaders de l'industrie et qu'il n'y a pas de logiciel qui prenne cela en compte. 79% des entreprises pensent que la gestion des opérateurs est utile ou essentielle en ordonnancement. Tandis que dans les logiciels actuels, les durées opérationnelles sont fixes, pour les industriels, la prise en compte de la qualification des opérateurs, qui est très importante, génère des durées variables. Pour eux, le niveau de qualification a (de temps en temps pour 47% d'entre eux et toujours pour 27% d'entre eux) une influence sur la durée de réalisation des tâches. Il en ressort un besoin de développement du lien entre les compétences des ressources humaines et la durée opérationnelle réelle, afin notamment de déterminer le potentiel réel de l'entreprise. Les décisions sont généralement prises en considérant un niveau opérationnel identique (celui de la meilleure ressource par exemple), plutôt qu'en prenant réellement en compte une vision globale de l'entreprise. Ceci peut s'expliquer par le fait que 33% des entreprises ont des difficultés pour développer une stratégie d'affectation des tâches à des ressources précises. Leurs difficultés sont principalement dues aux différences entre chaque opérateur. Cependant, si le niveau de compétence de chacun est connu, il apparaît d'autres problématiques qui sont l'équilibrage de la charge entre les ressources et la recherche d'un compromis entre la réactivité et les perturbations des employés occasionnées par la modification des emplois du temps lors d'insertion de tâche dans les planning. Nous considérons que les ressources travaillent en parallèle, au même moment, sur différentes tâches et que notre problème peut donc être assimilé à un problème à machine parallèle.

### 2.2.2 Un problème à machines parallèles

Un service de maintenance est un environnement composé de  $m$  opérateurs qui travaillent en parallèle. Ils peuvent tous traiter chaque tâche mais il n'y a aucune notion de proportion entre les différents temps de traitement. La ressource qui est la plus efficace pour un type de tâche ne le sera pas nécessairement pour toutes les tâches. La multiplicité des compétences montre que nous avons un problème à machine parallèle sans lien entre elles. Celui-ci se note  $R$  ou  $R_m | \beta | \gamma$ , (Pinedo, 1995), (Baptiste *et al.*, 2004).

Pfund *et al.* ont présenté un état de l'art sur les machines parallèles non reliées. Une partie est précisément dédiée au problème qui est le notre :  $R_m || C_{\max}$  dans les cas où les tâches ne soient pas pré-emptives (Pfund *et al.*, 2004). Parmi les problèmes d'ordonnancement à machines parallèles non reliées, ceux qui visent à minimiser la fin de l'ordonnancement (makespan) sont les plus étudiés. Parmi les auteurs qui ont travaillé sur ce sujet, certains ont développé des méthodes de résolution approchée, avec une grande rapidité d'exécution mais des résultats qui ne sont pas optimal. C'est le cas d'Ibarra *et al.* qui ont présenté une méthodologie qui sert toujours de base de comparaison pour des recherches dans ce domaine (Ibarra *et*

*al.*, 1977). Leur heuristique est basée sur un algorithme de liste et peut mener au pire cas.

D'autres auteurs ont, quant à eux, développés des méthodes exactes afin d'obtenir les solutions optimales. Mokotoff et Chrétienne comparent, dans leurs articles, les résultats obtenus par leur méthode de résolution exacte avec ceux obtenus à travers les algorithmes de Van de Velde et de Martello (Mokotoff *et al.*, 2002), (Martello *et al.*, 1997), (Van de Velde, 1993).

### **3. Description du Problème**

En ordonnancement et en planification, l'horizon est souvent découpé en période (le court, le moyen et le long terme). Cela permet la gestion du temps et la possibilité de modéliser notamment des problèmes liés à la production. On retrouve dans la littérature des procédures utilisant des horizons glissants dans de nombreuses études de planification de la production (Hétreux, 1996), (Fontan *et al.*, 2001). Les événements peuvent donc être étudiés sur chaque intervalle et pas sur une échelle de temps continue. Une fois que la date de fin de traitement de la tâche est déterminée, on en déduit la période d'insertion dans le planning. Le contexte de cet article se passe donc dans le moyen terme.

Dans l'industrie, la maintenance est généralement perçue comme une contrainte dans l'ordonnancement des tâches de production. Dans cette approche, nous considérons l'ordonnancement des tâches de maintenance, à l'inverse de celui de la production dans les problèmes classiques. Le personnel est donc le facteur limitant dans la réalisation de l'ordonnancement, au même titre que les machines le sont dans un ordonnancement d'activité de production. Les ressources humaines sont alors organisées au sein du service de maintenance qui doit donc planifier leur travail.

#### **3.1. Les équipements**

##### **3.1.1. Contractualisation et sous-traitance**

Au sein de chaque entreprise, le service de maintenance doit maintenir les équipements en état de fonctionnement. Le niveau de résultat à atteindre par le service maintenance est généralement prédéterminé. Dans un contexte de sous-traitance, les contrats signés entre les partenaires fixent les règles de leur coopération. Dans notre cas, c'est un sous-traitant de la maintenance et une entreprise qui sont concernés. Les contrats sont un agrément qui produit un effet de loi pour résoudre les situations conflictuelles ou particulières. A travers lui, nous retrouvons diverses informations telles que la disponibilité contractualisée pour les différents équipements concernés. Quand il y a une panne, ou, pour une autre raison, que l'équipement est arrêté, il est toujours urgent pour le client que celui-ci soit remis en fonctionnement rapidement. Cependant, pour le sous-traitant, au regard

de la disponibilité globale assurée sur l'équipement, la maintenance n'aura pas nécessairement à être assurée immédiatement.

### 3.1.2. Disponibilité des équipements

La disponibilité garantie des équipements est un pourcentage du temps d'ouverture de celui-ci. Dès lors que le temps d'ouverture est défini, nous obtenons sa disponibilité réelle à travers la formule suivante:

$$Disponibilité(\%) = \frac{Temps\_d'Ouverture - Arrêt\_Maintenance}{Temps\_d'Ouverture} \quad [1]$$

Le nombre et la nature des équipements à maintenir sont spécifiés dans le contrat. Dans le cas d'ateliers de production, incluant des groupes d'équipements similaires, il est possible de définir un taux de disponibilité global pour l'ensemble des équipements. De même que pour une machine seule, ce taux sera comparé aux engagements pris. Les variations entre la disponibilité contractualisée et la disponibilité réelle des différents équipements permet de déduire la priorité du traitement des différentes tâches.

La disponibilité étant définie par:

$A_j(t)$  : la disponibilité instantanée des équipements concernés par la tâche  $j$  à l'instant  $t$ , avec:

$$0 < A_j(t) < 100\% \quad [2]$$

$$Et : A_j(t_0) = 100\% \quad [3]$$

$AC_j$  : la disponibilité contractualisée pour l'équipement concerné par la tâche  $j$ , avec:  $0 < AC_j < 100\%$  [  $AV_j(t)$  ] la variation de disponibilité entre la disponibilité contractualisée et la disponibilité réelle de l'équipement

$$AV_j(t) = AC_j - A_j(t) \quad [4]$$

Nous parlerons donc de la criticité de l'intervention pour le sous-traitant afin de ne pas avoir de pénalités de non-respect de contrat.

### 3.1.2. Disponibilité garantie et pénalités

Le sous-traitant garantit donc un taux de disponibilité. Celui-ci se situe dans une



fourchette, « une classe ». Si, pour une machine ou pour un groupe de machines, l'objectif de disponibilité n'est pas atteint, celui-ci sera considéré comme étant de la classe inférieure et une ristourne équivalente au delta du basculement de classe sera accordée en guise de pénalité par le prestataire au client (Coût de maintenance corrective, préventive, et le niveau de pièce détachée cible).

Pour calculer le niveau de disponibilité qui sera éventuellement garanti dans le prochain contrat, le sous-traitant ne s'appuie pas sur le taux obtenu l'année précédente mais sur celui qui aurait dû être atteint.

Dans la littérature, de nombreuses études traitent des pénalités reçues en cas de franchissement de la limite contractualisée à la date de fin du contrat. C'est le cas en particulier des problèmes d'ordonnancement, sur une machine, de plusieurs tâches ayant une date de fin commune. L'objectif de ce type de problème est connu sous l'appellation de "earliness/tardiness problem". Seulement une tâche peut finir exactement pour cette date, les autres finissant soit avant et génèrent des pénalités d'avance, soit après et génèrent des pénalités de retard. (Shabtay *et al.*, 2006). Les problèmes d'ordonnancement avec date de fin commune ont été démontrés comme étant NP-complet (Non Polynomiaux, la solution optimale ne pouvant pas être obtenue pour des problèmes de grosse taille) (Lin *et al.*, 2006 ).

La gestion des ressources humaines, prenant en considération le niveau de compétence de chaque employé dans chacune de ses compétences, permettra une meilleure gestion de la durée de chaque tâche et donc de la durée totale du planning.

### 3.2. Les tâches

Sur le moyen terme, le service de maintenance doit planifier les tâches et affecter la meilleure ressource pour le traitement des différentes tâches de maintenance. La maintenance conditionnelle et préventive ont comme paramètres communs une durée connue : une date de début au plus tôt  $r_i$  avant laquelle la tâche ne peut pas être débutée et une date de fin au plus tard  $d_i$  avant laquelle le traitement de la tâche doit être terminé. Concernant les tâches de maintenance corrective, leur durée est basée sur une estimation et dépend d'un bon diagnostic. Leur date de début, au plus tôt  $r_i$  est généralement la date actuelle, car la maintenance est généralement requise dès lors que la tâche apparaît. Mais leur date de début de traitement est généralement ultérieure surtout s'il y a pénurie de la pièce de rechange nécessaire. Tout comme pour la maintenance préventive la date de fin est connue. Cela nous permet d'utiliser la même modélisation pour différent type de tâche. Une tâche  $j$  est composée de son temps de traitement  $p_j$  et par le type de compétence nécessaire à sa réalisation ( $j = 1 \dots n$ ). Les tâches se distinguent les unes par rapport aux autres par une compétence requise à chaque ressource. Par exemple, une compétence peut être en mécanique, en automatique ou encore une habilitation. La durée réelle d'une tâche  $j$  dépendra donc de la ressource qui aura en charge son traitement.

### 3.3. Les ressources humaines

Le service de maintenance est composé de  $m$  ressources humaines ( $i = 1 \dots m$ ), chacune caractérisée par un profil de compétence. Chaque ressource a donc un niveau de qualification correspondant à chaque type de tâche. C'est ce niveau de qualification qui fait que, d'une ressource à une autre, le temps de traitement ne sera pas le même. La durée réelle de la tâche  $j$  en cas d'affectation à la ressource humaine  $i$  sera donc notée  $p_{ij}$ . Avec:

$$p_{ij} = f(p_j, C_{ij}), \forall i \in \{1, \dots, m\} \quad [5]$$

Où  $C_{ij}$  est le taux de compétence de la ressource  $i$  dans la compétence requise pour le traitement de la tâche  $j$ . Il est donc possible de représenter cela par une matrice, dans laquelle, pour chaque type de tâche et pour chaque ressource, on obtient le taux de compétence correspondant.

$$\begin{bmatrix} C_{1,1} & \dots & C_{1,j} & \dots & C_{1,n} \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ C_{i,1} & & C_{i,j} & & C_{i,n} \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ C_{m,1} & \dots & C_{m,j} & \dots & C_{m,n} \end{bmatrix}$$

Le traitement de deux tâches de type différent par deux ressources différentes, permet d'observer qu'une ressource peut être la plus performante pour une tâche mais ne l'est pas nécessairement pour la deuxième.

## 4. MODELE

### 4.1. Données

$w_j$  : Les pénalités pouvant être obtenues si le traitement de la tâche  $j$  n'est pas réalisé dans les temps,

$Cr_{j,t} = f(AV_j, w_j)$  : Criticité de la tâche de maintenance  $j$  à la date  $t$ ,

$d_j = g(Cr_j)$  : Due-date de la tâche  $j$ ,

$\bar{d}_j = \max(d_j)$  : Deadline de la tâche  $j$ .

La durée prise en compte est la durée précisée dans le contrat, sur laquelle est garantie la disponibilité (en règle générale, on se basera sur le temps d'ouverture de l'équipement sur une durée d'un an). Cette durée est donc égale à 100% du temps.

Un arrêt de 1% du temps d'ouverture pendant l'année sur un équipement fera donc perdre 1% de disponibilité à celui-ci.

#### 4.2. Variables

$t_j$  : Date de début planifié de la tâche  $j$ ,

$x_{ij}$  : Indicateur d'affectation de la tâche:  $x_{ij} = 1$  si la tâche  $j$  est affectée à la ressource  $i$ , autrement  $x_{ij} = 0$ .

#### 4.3. Contraintes

- Chaque tâche doit être affectée à une seule ressource:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \forall i \in \{1, \dots, m\} \quad [6]$$

- Date de début au plus tôt:

$$\forall j, t_j \geq r_i \quad [7]$$

La tâche  $j$  ne peut pas être planifiée sur l'équipement  $i$  avant que celui-ci ne soit disponible.

- Date de fin (Due Date):

$$\forall j, t_j + p_{i,j} \leq \bar{d}_j \quad [8]$$

with:

$$d_j \leq \bar{d}_j \quad [9]$$

Il est préférable que le traitement de la tâche  $j$  se termine avant sa due-date  $d_j$  mais elle doit obligatoirement être traitée avant sa deadline  $\bar{d}_j$ .  $d_j$  sera donc utilisé afin de déterminer la fonction objectif.

#### 4.4. Objectifs

Afin de respecter les contrats, les délais de traitement doivent être minimisés. Pour des raisons de performance, les tâches sont affectées aux ressources les plus efficaces. Nous minimiserons donc le temps de travail de chacune des ressources et donc la durée totale de l'ordonnancement. Dans la partie suivante, nous présenterons l'algorithme que nous avons développé afin de minimiser le  $C_{max}$ .

## 5. Résolution du problème

### 5.1. Borne inférieure

Nous utilisons une Borne inférieure qui est la limite la plus simple pour un problème du type  $R_m \| C_{\max}$ . Celle-ci est rencontrée en particulier dans les travaux d'Ibarra et al. ou de Mokotoff et Chrétienne. Elle consiste à prendre pour chacune des  $n$  tâches, la plus performante des  $m$  ressources et d'en déduire sa durée  $p_{ij}$  la plus courte dans notre système. Nous obtenons ensuite la Borne inférieure par le calcul suivant:

$$LB(C_{\max}) = \max \left\{ \left\lceil \frac{1}{m} \sum_{j=1}^n p_j^{\min} \right\rceil ; \max_{j \in \{1, \dots, n\}} p_j^{\min} \right\} \quad [10]$$

avec:

$$p_j^{\min} = \min p_{ij}, j \in \{1, \dots, n\} \quad [11]$$

## 5.2. Algorithme d'affectation des tâches

```

L = { Tâches rangées par ordre décroissant de leur durée maximale  $p_{ij}$  };
 $\bar{L} = \emptyset$ ;
Tant que ( $L \neq \emptyset$ ) Alors
   $k \leftarrow$  première tâche de L ;
   $i \leftarrow$  ressource la plus efficace pour le traitement de  $k$  ;
  Si ( $\sum_{j \in \bar{L}} p_{ij}x_{ij} + p_{ik} \leq LB$ ) Alors
     $x_{ik} \leftarrow 1$ ;  $x_{ak} \leftarrow 0$ , for  $a = 1 \dots n$  and  $a \neq i$ ;
     $\bar{L} \leftarrow \bar{L} + k$ ;  $L \leftarrow L - k$ ;
  Si non
    Essaie d'affecter la tâche  $k$  à la ressource la plus efficace  $l$ ,
    avec  $l = 1 \dots n$  and  $l \neq i$  pire cas
    qui respecte  $\sum_{j \in \bar{L}} p_{lj}x_{lj} + p_{lk} \leq LB$ ;
    Si ( $l$  pas trouvé) Alors
      trouve la ressource  $l$  telle que :  $\min_{l=1 \dots n} \sum_{j \in \bar{L}} p_{lj}x_{lj} + p_{lk}$ 
      Si ( $l =$  pire cas) Alors
        Exception Algo. 2 ;
      Fin Si
    Fin Si
     $x_{lk} \leftarrow 1$ ;  $x_{ak} \leftarrow 0$ , pour  $a = 1 \dots n$  et  $a \neq l$ ;
     $\bar{L} \leftarrow \bar{L} + k$ ;  $L \leftarrow L - k$ ;
  Fin Si
Fin Tant que

```

Algorithme 1: Algorithme principal

```

Insère la première tâche de la liste qui, ne serait pas
traitée par la moins performante, en tête de liste.
Si (toutes les tâches  $\in L$  vérifient  $p_j^{\max} = \max p_{ij}$ ) Alors
  Alors affecte les tâches sans se préoccuper du fait que ce soit à la moins
  performante des ressources
Fin Si

```

Algorithme 2: Exception

### 5.3. Pénalités de retard

Il y a différentes méthodes pour prendre en compte le retard dans le traitement des tâches. Dans l'algorithme présenté précédemment, nous avons travaillé à réduire le plus possible la date de fin de l'ordonnancement ( $C_{max}$ ). Nous comparons donc les résultats obtenus, réorganisés avec un post-traitement du type Earliest Due Date (EDD) avec deux autres possibilités.

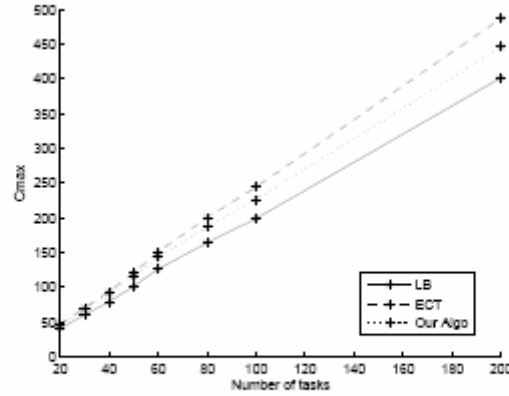
Afin de travailler sur le retard des tâches, nous remplacerons le prétraitement qui consistait à trier les tâches par ordre de durée maximales décroissantes par un tri réalisé par due-date croissante  $d_j$  (EDD). Pour prendre en compte le potentiel de pénalités associées à chaque tâche, nous avons aussi essayé un pré-tri du type WSPT (Weighted Shortest Processing Time first) (WSPT) qui trie les tâches suivant leur  $w_i/p_i$  décroissant.

Au cours de l'affectation des tâches, le tri réalisé au préalable peut être bouleversé. Pour annihiler cet effet, nous avons placé un post-traitement EDD, réalisé dans les affectations de chacune des ressources. Les résultats de cette heuristique sont présentés dans le tableau 1, dans lequel H-EDD signifie notre Heuristique suivie par un post-traitement EDD, EDD-H-EDD signifie que le pré-tri du type LPT (Longest Processing Time) effectué à l'origine dans notre heuristique est remplacé par un pré-tri du type EDD. WSPT-H-EDD signifie que le prétraitement est du type WSPT.

## 6. Résultats

### 6.1. Génération des données

Nous avons choisi d'utiliser un algorithme tel que celui d'Ibarra (décrit précédemment) et de l'améliorer pour pouvoir l'utiliser pour répondre à notre problème (Ibarra *et al.*, 1977). Cet algorithme est appelé ECT: Earliest Completion Time. Les résultats obtenus par ces algorithmes ont été présentés dans l'article présenté par Marmier *et al.* (Marmier *et al.*, 2006). Nous avons réalisé ces tests sur un Pentium IV 3.00GHz en générant aléatoirement les valeurs des  $p_{ij}$ . Ces valeurs sont calculées par le produit de la durée de base des tâches qui est un entier obtenu par une distribution uniforme comprise dans l'intervalle  $[1, 16]$ . Cette durée est multipliée par le niveau de la ressource dans la compétence correspondante. Pour chaque tâche, le type de compétence requise est déterminé par un entier compris dans l'intervalle  $[1, 3]$  avec une distribution uniforme. Elle se réfère à un taux de compétence qu'à chacune des ressources qui est un réel obtenu par une distribution uniforme dans l'intervalle  $[1.01, 2.00]$ .



**Figure 2.** Evolution du  $C_{max}$  sur un problème à 5 ressources

Les pénalités sont déterminées par un entier obtenu avec une distribution uniforme dans l'intervalle  $[1, 100]$ . Elles sont infligées si le traitement de la tâche n'est pas terminé avant sa due-date. Nous avons utilisé cet algorithme dans trois états de charges différentes (faibles, moyennes et élevées). Ces conditions sont déterminées lors de la génération des due-dates qui sont générées dans un futur plus ou moins éloigné. Les due-dates des tâches ne peuvent pas être fixées avant  $t = now + 2 * p_j$  ("now" étant la date de lancement du programme, en seconde). Pour réguler la charge nous modifions la date maximale  $t_1$  que peut avoir cette due-date. Celle-ci est donc un réel obtenu par une distribution uniforme dans l'intervalle  $[t, t_1]$ , dans lequel en cas de faible charge:  $t_1 = t + 720t.u.$ , de charge moyenne:  $t_1 = t + 540t.u.$  et en cas de forte charge:  $t_1 = t + 360t.u.$ . Dans chacun des états de charge, nous avons réalisé trois ensembles de simulations. Ces exemples ont tous été réalisés avec 5 ressources et 200 tâches et chaque résultat est la moyenne de 20 cycles de tests

## 6.2. Algorithme d'affectation

L'écart type (ET) permet de savoir que, pour un même ensemble de données, la charge varie entre chaque ressource. Dans le cas d'un  $C_{max}$  identique pour deux simulations, un écart type élevé signifie que les ressources qui ne sont pas concernées par le  $C_{max}$  ont un temps libre important qui pourra éventuellement accueillir de nouvelles tâches. Notre objectif n'est pas une recherche d'optimal, mais d'un résultat bon (figure 2) et rapide. La solution obtenue sera modifiée et complétée ultérieurement par d'autres traitements qui nécessiteront aussi des temps de calcul. C'est pourquoi nous avons orienté nos recherches vers le développement d'une

heuristique. La Borne inférieure (LB) utilisée dans l'algorithme n'est pas la meilleure limite basse que l'on puisse utiliser. Celle-ci n'est effectivement atteignable que dans de rares et particuliers cas. Une meilleure limite basse serait globalement plus élevée et permettrait d'affecter plus de tâches aux ressources les plus efficaces. Cependant la variation maximale entre LB et notre solution varie seulement de 5% pour un problème avec deux ressources et vingt tâches à 12% pour un problème à huit ressources et deux cents tâches. Cette heuristique présente aussi une amélioration de 8% par rapport à ECT pour le problème à huit ressources et deux cents tâches, qui est un problème de grosse taille. Le temps de traitement, quant à lui, est un peu augmenté avec notre algorithme, cependant ceci n'est pas perceptible pour l'utilisateur du programme.

### 6.3. Gestion des retards

Au regard des résultats obtenus dans le tableau 1, l'heuristique H-EDD nous permet d'obtenir les meilleurs résultats concernant la minimisation du  $C_{max}$ . Dans les cas où la charge était faible ou moyenne, l'heuristique WSPT-H-EDD présente les meilleurs résultats concernant le nombre de tâches en retard ( $\sum U_i$ ) ainsi qu'au regard de la somme pondérée des retards ( $\sum w_i T_i$ ), alors que, avec une forte charge les meilleurs résultats sont donnés par EDD-H-EDD.

Tableau 1. *Gestion des retards.*

| Charge<br>Série |                | Faible |      | Moyenne |      | Forte |      |
|-----------------|----------------|--------|------|---------|------|-------|------|
|                 |                | 1      | 2    | 1       | 2    | 1     | 2    |
| H-EDD           | $\sum U_i$     | 3      | 2    | 22      | 22   | 148   | 141  |
|                 | $\sum w_i T_i$ | 173    | 113  | 1141    | 1112 | 7301  | 7198 |
|                 | $C_{max}$      | 448    | 441  | 464     | 453  | 461   | 437  |
| EDD-H-EDD       | $\sum U_i$     | 33     | 27   | 71      | 73   | 136   | 130  |
|                 | $\sum w_i T_i$ | 1656   | 1356 | 3487    | 3669 | 6841  | 6711 |
|                 | $C_{max}$      | 456    | 450  | 473     | 461  | 468   | 445  |
| WSPT-H-EDD      | $\sum U_i$     | 3      | 2    | 21      | 15   | 143   | 135  |
|                 | $\sum w_i T_i$ | 162    | 154  | 1027    | 801  | 7142  | 6936 |
|                 | $C_{max}$      | 454    | 448  | 469     | 459  | 466   | 444  |

## 7. Conclusions

Comme mentionné précédemment, ce travail permet d'affecter des tâches de maintenance aux opérateurs sous contrainte de compétence, en minimisant la date de fin de l'ordonnancement. Il a été réalisé pour l'ordonnancement des tâches à moyen terme, lors du glissement de l'horizon. Une bonne stratégie d'affectation des tâches de maintenance prend en compte les compétences de chacun afin de déterminer l'ordonnancement pour l'ensemble des ressources. Nous avons présenté dans cet article les résultats obtenus. Ceux-ci sont obtenus rapidement et sont proches de l'optimal. Nous considérons aussi l'aspect des retards que peuvent prendre les tâches et les pénalités entraînées en comparant différents algorithmes de liste. Par la suite,



nos travaux consisteront à prendre en compte les perturbations que peuvent subir un ordonnancement existant, avec notamment l'insertion dynamique de tâches. Puis, nous étendrons notre travail à la gestion des tâches de maintenance en contexte distribué.

## 8. Bibliographie

- Adzakpa K.-P., Adjallah K.-H., « Minimisation du temps de séjour pondéré avec dates de disponibilité inégale des tâches : application à la maintenance », *MOSIM*, 2003.
- Aggoune R., « Job shop à deux jobs avec prise en compte de contraintes de disponibilité des machines », *MOSIM*, 2003.
- Baptiste P., Carlier J., Jouglet A., « Minimiser la somme des retards sur une machine avec dates de disponibilité », *MOSIM*, 2001.
- Baptiste P., Néron E., Sourd F., *Modèles et Algorithmes en Ordonnancement*, Groupe GOTH, 2004.
- Boumane A., Talbi A., Bouami D., Tahon C., « Contribution méthodologique à la construction d'un référentiel de compétences en maintenance industrielle », *Penttom*, 2003.
- de Velde S. V., « Duality-based algorithms for scheduling unrelated parallel machines », *ORSA Journal of Computing*, vol. 5, p. 192-205, 1993.
- Fontan G., Mercé C., Erschler J., *Performance industrielle et gestion des flux*, Lavoisier, chapter 3, p. 69-111, 2001.
- Hétreux G., Structures de décision multi-niveaux pour la planification de la production : robustesse et cohérence des décisions, PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 1996.
- Ibarra O., Kim C., « Heuristic algorithms for scheduling independent tasks of non identical processors », *Journal of the Association for Computing Machinery*, vol. 24, p. 280-289, 1977.
- Letouzey A., Ordonnancement interactif basé sur des indicateurs : Application à la gestion de commandes incertaines et à l'affectation des opérateurs, PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2001.
- Lin S.-W., Chou S.-Y., Ying K.-C., « A sequential exchange approach for minimizing earliness-tardiness penalties of single-machine scheduling with a common due date », *European Journal of Operational Research*, 2006.
- Marmier F., Varnier C., Zerhouni N., « Maintenance Activities Scheduling Under Competencies Constraints », *À paraître dans ICSSM*, 2006.
- Martello S., Soumis F., Toth P., « Exact and approximation algorithms for makespan minimisation on unrelated parallel machines », *Discrete Applied Mathematics*, vol. 75, p. 169-188, 1997.
- Mjema E., « An analysis of personnel capacity requirement in the maintenance department by using a simulation method », *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 8, n° 3, p. 253-273, 2002.

- Mokotoff E., P. Chrétienne, « A cutting plane algorithm for the unrelated parallel machine scheduling problem », *European Journal of Operational Research*, vol. 141, p. 515-525, 2002.
- Pfund M., Fowler J. W., Gupta J. N. D., « A survey of Algorithms for single and multi-objective unrelated machine deterministic scheduling problems », *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, vol. 21, n° 3, p. 230-241, 2004.
- Pinedo M., *Scheduling, Theory, Algorithms and Systems*, Prentice, 1995.
- Shabtay D., Steiner G., « Two due date assignment problems in scheduling a single machine », *Operation Research Letters*, 2006.
- Sheen G.-J., Liao L.-W., « Scheduling machine-dependent jobs to minimize lateness on machines with identical speed under availability constraints », *Computers & Operations Research*, 2005.